



José Antonio Fiestas Iquira
National Astronomical Observatory of China, Pekín
Cidiacotec, Lima, Perú

Recibido: 27 de julio de 2015 / Aprobado: 14 de agosto de 2015

Resumen

En este artículo se fundamenta la aplicación de técnicas de supercomputación a través de un ejemplo en la investigación de fenómenos astronómicos de evolución de núcleos galácticos y agujeros negros en escalas de la edad del Universo; donde los modelos numéricos de dinámica estelar con simulaciones en supercomputadoras son imprescindibles. El presente trabajo fue realizado en diversos centros de investigación alrededor del mundo, y el software empleado utilizó técnicas de N-cuerpos en C++, CUDA (Compute Unified Device Architecture) y paralelizado con MPI (Message Passing Interface). La escalabilidad del problema permite acceder a modelos numéricos exactos de la evolución de sistemas de millones de estrellas. Los resultados demuestran que los agujeros negros en todas sus variantes definen la forma y dinámica de galaxias, y tienen, por ello, consecuencias en el destino de estas.

Palabras clave: high performance computing / supercomputadoras / modelos de N-cuerpos / dinámica estelar / galaxias / agujeros negros

The Role of Supercomputing in Research: Astrophysics of Galactic Nuclei and Black Holes

Summary

This article is based on the application of supercomputing techniques through an example in the investigation of the astronomical phenomena of evolution of galactic nuclei and black holes within the time period of the Universe's existence. Numerical models of stellar dynamics simulations on supercomputers are essential in this area of research. This work was done in various research centers around the world, and the software employed uses N-body techniques in C ++, CUDA (Compute Unified Device Architecture) and parallelized by using a MPI (Message Passing Interface). The scalability of the problem allows one to access accurate numerical models regarding the evolution of the systems of millions of stars. The results show that black holes, in all its variations, define the shape and dynamics of galaxies, at times comparable to the age of the Universe, and have, for that reason, consequences in the destiny of itself.

Key words: high performance computing / supercomputers / N-body models / stellar dynamics / galaxies / black holes

* Expreso mi agradecimiento al Observatorio Nacional de China (NAOC, Pekín, China), el Centro de Astronomía de Heidelberg (ZAH, Heidelberg, Alemania) y el Lawrence Berkeley National Laboratory (UCB, Estados Unidos) por el apoyo recibido al permitirme usar sus supercomputadoras para

Introducción

Actualmente, la sociedad se encuentra dominada por el avance informático y tecnológico, tan es así que el poder computacional (capacidad de procesamiento y velocidad de comunicación) se ha desarrollado considerablemente en las últimas décadas, de acuerdo con lo formulado por Moore (1965), en su denominada Ley de Moore. Día tras día se experimenta un avance continuo en aplicaciones computacionales, y el Perú no es una excepción; conceptos clave como computación de alto rendimiento (*high performance computing* - HPC), computación *grid* y *big-data* son de uso común y se utilizan técnicas modernas de procesamiento de datos, así como optimización de análisis para estos. El objetivo principal es incrementar el rendimiento de procesos en el ámbito industrial y de servicios, por lo cual resulta imperioso acelerar el progreso en estas áreas, ya que de ello depende el avance de la sociedad hacia la modernidad en un mundo competitivo.

En el Perú, la computación es de fácil acceso académico y de uso cotidiano en múltiples ámbitos sociales e industriales. Hoy en día, es inimaginable administrar una empresa, sea mediana o grande, sin la implementación de un sistema computacional de al menos nivel regular (computadoras personales o un sistema de red). Las empresas de servicio solo pueden elevar su eficiencia integrando y ampliando su sistema computacional para mejorar el flujo de producción o la atención al cliente. De igual manera, los individuos están cada vez más conectados por medio de la informática y las redes sociales, lo que deriva en un fenómeno de uso de minería de datos, muy utilizado actualmente en ventas y mercadeo.

No es de extrañar que esta tendencia continúe en forma creciente en el futuro inmediato, pues este fenómeno ha evolucionado ya internacionalmente, y se han reflejado sus primeras repercusiones en nuestro país. El cambio conduce a la utilización y explotación de la computación de alto rendimiento, entiéndase esta como la utilización de computadoras altamente eficientes, más que cualquier computadora personal o *laptop*. La disciplina es conocida como supercomputación y su instrumento, la supercomputadora. La arquitectura de una supercomputadora es una distribución determinada de computadoras (topología), destinada a incrementar el poder de cálculo al permitir el procesamiento en paralelo de tareas y una comunicación en alta velocidad.

Mejorar el rendimiento de un proceso, en decenas o cientos de veces, es el medio de optimizar procesos y lograr mayor rentabilidad en la industria de productos elaborados. En el caso de la industria de servicios, esta tiene una aplicación directa

la elaboración de este estudio. También expreso mi reconocimiento por la importante colaboración que me brindó el Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación, Asesoría y Capacitación en Ciencia y Tecnología (Cidiacctec).



de estas técnicas, ya que un servicio necesita el manejo adecuado de información y su disposición al cliente. Debido a la cantidad de información disponible, optimizar estos servicios es algo que ya no puede ser realizado por una sola computadora, sino que es necesario un arreglo de múltiples procesadores trabajando en paralelo.

La inmersión de la informática en nuestra economía y nuestra industria es inevitable desde hace décadas, como en cualquier país del mundo moderno; por ende, el *expertise* en sistemas informáticos se ha desarrollado rápidamente en la población académica. El aprovechamiento del conocimiento es imprescindible para un desarrollo sostenido en el futuro e implementar sistemas informáticos, v.g. supercomputadoras y sistemas de redes en la industria privada y en el Estado es un paso que inevitablemente tendrá que darse en un futuro próximo, por lo que es necesario tomar la iniciativa.

Desde sus inicios, la supercomputación constituyó uno de los aspectos clave para la optimización de procesos (Chen, Lin, Hsiung y Hu, 2009), y su desarrollo ha ido alcanzando niveles exponenciales de rendimiento, gracias al avance tecnológico de computadoras individuales. Esto ha permitido, a su vez, la escalabilidad de procesos al integrar las CPU en topologías en paralelo. En el artículo se presenta una aplicación de técnicas de supercomputación en la astrofísica.

La astronomía, ciencia tan antigua como el ser humano, deviene actualmente en la moderna astrofísica, que se manifiesta en dos áreas: la teórica y la experimental (o de observación). La astrofísica teórica hoy en día está basada en la elaboración de modelos computacionales de aplicación en la física del Universo, el cual está dominado por materia en forma de galaxias, estrellas, planetas y nubes de gas y polvo. Por otro lado, los núcleos galácticos, a su vez, contienen agujeros negros supermasivos (SMBH), el motor de quásares y galaxias activas.

Estos objetos astronómicos son objetos macroscópicos en el Universo, con un poder de influencia (gravitatoria) inmenso sobre los demás cuerpos estelares. Hay evidencia creciente de que los SMBH juegan un papel preponderante en la formación y evolución galáctica. Son comúnmente observados en galaxias cercanas (Shankar, 2009), mientras que los quásares (Degraf, Di Matteo y Springel, 2010; Willott et al., 2010) muestran también que muchos de ellos alcanzaron sus masas en un tiempo muy remoto. Sin embargo, el origen de los SMBH aún es debatido (Madau y Rees, 2001; Mapelli, Huwyler, Mayer, Jetzer y Vecchio, 2010). Gracias a las imágenes del telescopio espacial Hubble (HST), tenemos información sobre las altas densidades en los centros de galaxias cercanas (Coté et al., 2007; Glass et al., 2011), directamente ligadas a la presencia de agujeros negros masivos centrales.

A partir de estas observaciones, modelos teóricos han inferido SMBH de masas entre 10⁶ y 10⁹ masas solares (Kormendy, 2004). A su vez, observaciones en el infrarrojo de órbitas estelares en el centro de la Vía Láctea, derivaron en la

detección de un agujero negro masivo de $3-4 \times 10^6$ masas solares (Eckart, Genzel, y Schödel, 2004). Adicionalmente, la demografía de agujeros negros ha brindado una correlación entre su masa y la dispersión de la velocidad de las estrellas en el bulbo galáctico (Ferrarese y Merritt, 2000). Construir modelos de dinámica estelar para estos objetos es aún un reto en el desarrollo de *software* y *hardware*; se han establecido algunas técnicas, como los modelos analíticos, tal como el modelo Fokker-Planck (Fiestas, Spurzem y Kim, 2006), así como modelos de cálculo directo de interacción (N-cuerpos); sin embargo, con esta última técnica aún no se han simulado escenarios que incluyan un número realista de cuerpos estelares (Berczik, Merritt, Spurzem y Bischof, 2006). Usualmente, los modelos de sistemas estelares usados para corroborar observaciones de este tipo (sean analíticos o directos), están basados en una distribución inicial esférica de la materia estelar, algo que dista de la realidad. En este estudio se analiza la naturaleza elíptica y rotatoria inicial de las galaxias durante su formación, y se investigan las implicancias de las condiciones iniciales y en su evolución.

Este desarrollo ha permitido la evolución de técnicas de HPC y sus aplicaciones. El modelamiento numérico es ahora un pilar de la ciencia, en adición a la teoría clásica y el experimento. El procesamiento de datos exige el uso de *software* complejo para transformar información en resultados, objeto de análisis. El uso de supercomputadoras en este caso es crucial, y se mantiene en desarrollo constante por las exigencias, cada vez mayores, de escalabilidad y exactitud de resultados. A pesar de que existen técnicas que permiten simular sistemas astronómicos (o en general de grandes cantidades de información) de una forma confiable (como las técnicas Fokker-Planck mencionadas permiten conocer detalles de la simulación), las técnicas directas, como de N-cuerpos, que un modelo analítico no puede brindar (v.g. posición estelar en un sistema galáctico, distribución genética en un ADN, renderizado de imágenes de alta resolución, etc.).

Nos encontramos en una revolución de paradigmas en paralelo, cuyo propósito es llevar tecnologías actuales a escalas de Exaflops (1018 operaciones de coma flotante por segundo), dirigidas a resolver problemas multiescalables. El último paso en este esfuerzo ha sido dado explotando el uso del GPU (Graphical Processing Units) para cálculos generalizados. Este es usado en aplicaciones físicas/astrofísicas, procesamiento de video e imágenes, simulaciones de ingeniería, química cuántica, etc.

Las áreas de aplicación de estos sistemas computacionales crece día tras día, tanto en áreas de la física/astrofísica, procesamiento de video e imágenes, simulaciones de ingeniería, química cuántica, etc. (figura 1). Las sociedades alrededor del mundo se desarrollan explotando el conocimiento respaldado por la tecnología, lo que constituye una motivación para estudiantes y docentes en llevar a cabo y promover la aplicación de técnicas de paralelismo y supercomputación en trabajos de tesis y maestrías, con el fin de elevar el nivel de aprendizaje e investigación

en las universidades e instituciones académicas en general. La industria, de igual modo, no debe ser ajena a este proceso, sino aprovecharlo para mejorar eficiencia y rentabilidad en el negocio. La HPC y la supercomputación se convierten, entonces, en el instrumento ideal para el desarrollo tecnológico de un país, como sucede en muchas partes del mundo.

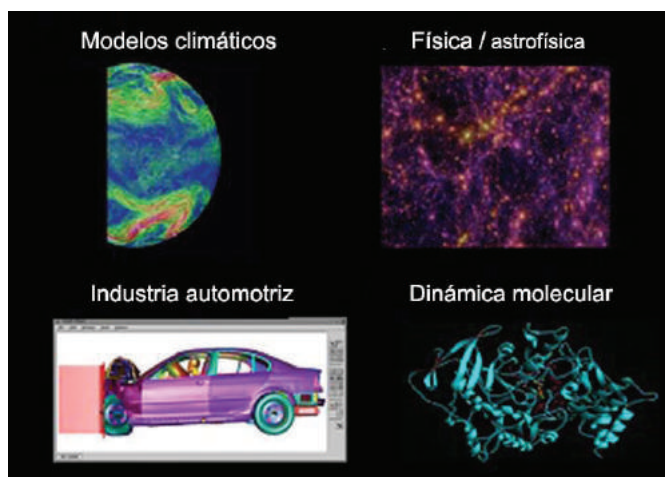


Figura 1. Uso de la HPC y las supercomputadoras en la investigación y la industria
Elaboración propia

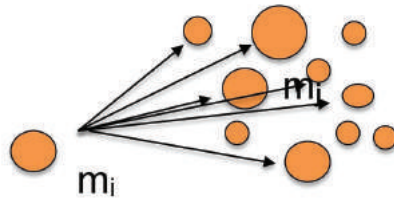
El presente artículo está estructurado de la siguiente manera: en la sección 1 se detalla el uso de supercomputadoras en la investigación presentada; en la sección 2 se describe el modelo teórico utilizado y su implementación; en la sección 3 se exponen los principales resultados, y en la sección 4 se listan las conclusiones.

1. HPC y supercomputación

Este estudio presenta la aplicación directa de técnicas HPC a través del uso de supercomputadoras en la investigación científica (astrofísica). El uso de HPC se fundamenta en los siguientes puntos:

- El número grande de cuerpos (estrellas) N hace que el tiempo de cálculo de fuerzas sea de orden $O(N^2)$.
- Los sistemas reales evolucionan en escalas de tiempo largas, lo que significa un número grande de iteraciones, típicamente de millones.
- No existe una solución analítica para este tipo de problemas; es decir, no hay aproximación comparable al cálculo directo de fuerzas.
- El requerimiento de memoria es $\sim N^2$.

Básicamente, lo que se busca es el cálculo de interacciones gravitatorias entre N cuerpos (estrellas en una galaxia), como se aprecia en la figura 2.



$$F_i = -Gm_i \sum_{\substack{1 \leq j \leq N \\ j \neq i}} \frac{m_j r_{ij}}{\|r_{ij}\|^3}$$

Número de cálculos de fuerzas: $N(N-1)/2$

Figura 2. Cálculo de N fuerzas gravitatorias en un modelo de N-cuerpos

Fuente: Fiestas (2011). IEEE 18th Real-time Conference, Berkeley, CA

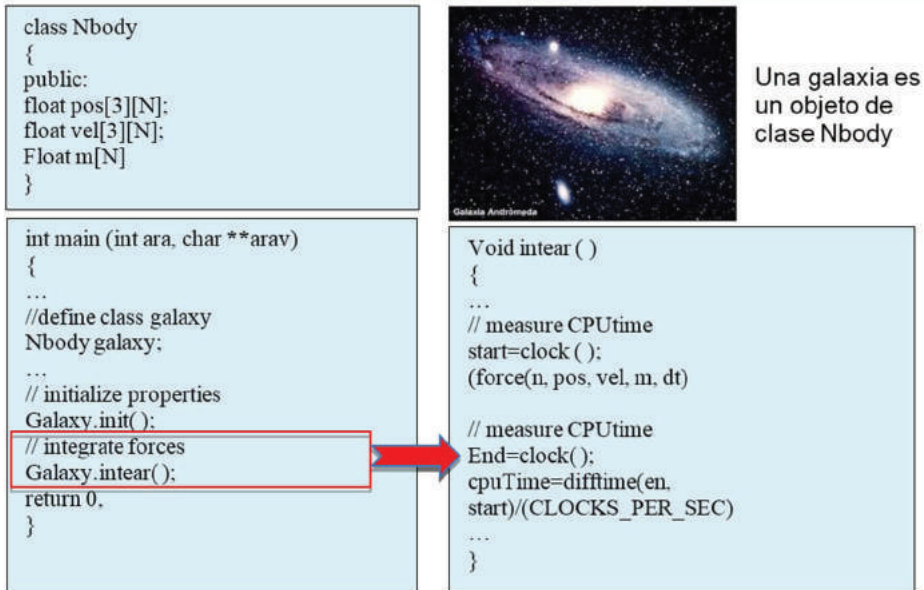


Figura 3. Seudocódigo en serie de cálculo de fuerzas entre N cuerpos
Elaboración propia

El pseudocódigo serial de cálculo directo de N-cuerpos se esquematiza en la figura 3, y la función de cálculo de fuerzas se expone en la figura 4, donde se aprecia el doble bucle en i y j , que son responsables por el cálculo de interacción gravitatoria de todas las partículas. Se indica, además, la cantidad de operaciones de coma flotante por segundo (*flops*).

```

void force(int n, float pos[ ][..], float vel[ ][..], float m[..], float dt)
{
    // sume over i
    for (int i=0; i<n; i++)
    {
        float my_r_x = r_x[i];
        // sume over j
        for (int j=0; j<n; j++)
        {
            If (j!=i) //avoid i=j
            {
                // compute accelerations
                float d = r_x[j] - my_r_x; // 1 flop
                a_x += G*m[j]/(d*d); // 4 flops
                ...
            }
        }
        //update velocities
        v_x[i] += a_x*dt; // 2 flops
        // update positions
        r_x[i] += v_x[i]*dt; // 2 flops
    }
}

```

Figura 4. Función *force* (cálculo de fuerzas)

Elaboración propia

El tiempo de ejecución del código en una sola CPU dependerá directamente del número total de partículas durante la simulación. Asimismo, en una primera optimización, se aplicó la programación de unidades de procesamiento gráfico (GPU). El resultado de una comparación de ambas técnicas puede verse en la figura 5.

Nótese que la escala de tiempo está dada en milisegundos, y se observa que el tiempo de cálculo es hasta dos órdenes de magnitud más rápido si es ejecutado en GPU. Recuérdese que la arquitectura de las GPU es un sistema integrado en paralelo. El pseudocódigo en CUDA se aprecia en la figura 6. La fuente en C++ es invariante (figura 3). Obsérvese el uso de directivas para asignar (*cudaMalloc*) y copiar memoria (*cudaMemcpy*). Asimismo, el llamado de la función *force_kernel* incluye definiciones correspondientes a la arquitectura de la GPU (*blockIdx*, *blockDim*, *threadIdx*).

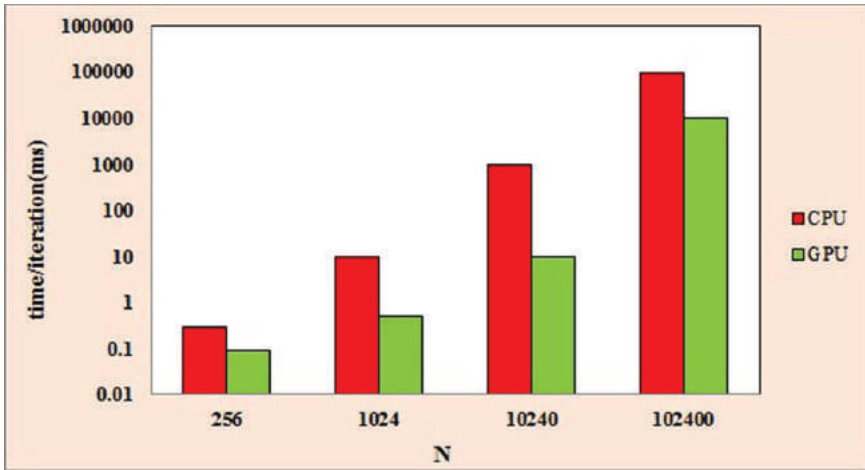


Figura 5. Escalabilidad en CPU vs. GPU, de algoritmos de N-cuerpos
Fuente: Fiestas (2011). IEEE 18th Real-time Conference, Berkeley, CA

```

void integr ( )
{
    int nthreads = 256;
    int nblocks = n/nthreads;

    cudaMalloc((void **)&dev_posx, n * sizeof(float));
    cudaMemcpy(dev_posx, posx, n * sizeof(float), cudaMemcpyHostToDevice);

    force_kernel<<<nblocks,nthreads>>>(n,dev_posx,dev_posy,dev_posz,dev_velx,dev_vely,dev_velz,
    dev_m,dt);

    cudaMemcpy(posx, dev_posx, ntot * sizeof(float), cudaMemcpyDeviceToHost);
}
    
```

Figura 6. Seudocódigo de cálculo de fuerzas entre N cuerpos
Elaboración propia

En la figura 7 se muestra el pseudocódigo de la función *force_kernel()* incluida en el pseudocódigo del cálculo de fuerzas entre N cuerpos.

En la figura 8 se muestra la *performance* en FLOP (operaciones de coma flotante por segundo) obtenido por CPU/GPU individuales. La *performance* de las GPU se mantiene en por lo menos dos órdenes de magnitud sobre las CPU.


```
__global__ void force_kernel (int n, float *posx,..., float*velx,..., float *m, float dt)
{
    int i = blockIdx.x*blockDim.x + threadIdx.x;
    if(i < n){
        float my_posx = posx[i];
        // sume over j
        for (int j=0; j<n; j++)
        {
            if (j!=i)
            {
                // compute accelerations
                float d = posx[ j ]-my_posx;
                a_x += G*m[ j ]/(d*d);
                ...
            }
        }
        //update velocities
        velx[ i ] += a_x*dt;
        posx[ i ] += velx[i]*dt;
    }
}
```

Figura 7. Función *force_kernel()* de cálculo de fuerzas
Elaboración propia

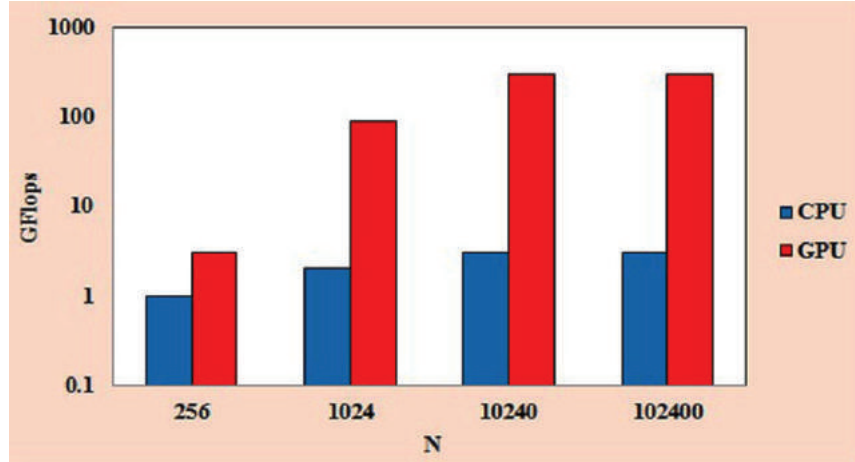


Figura 8. Número de FLOP, CPU vs. GPU, para N-cuerpos
Fuente: Fiestas (2011). IEEE 18th Real-time Conference, Berkeley, CA

La siguiente optimización viene a través del uso de técnicas de paralelismo MPI en los sistemas antes mencionados. El pseudocódigo con MPI se muestra en la figura 9, en la cual se observa el uso de principalmente dos directivas MPI: `MPI_Bcast` se utiliza para distribuir la variable *nbody* (número total de partículas) entre todos los procesos, mientras que `MPI_Allreduce()` se emplea para recopilar el cálculo de fuerzas de cada proceso, sumarmas y almacenarlas en la variable *force*.

```
int main (int arg, char**argv)
{
...
//define class galaxy
Nbody galaxy;
MPI_Bcast(&nbody,1,MPI_INT,0,MPI_COMM_WORLD);
// initialize properties
galaxy.init();
...
// integrate forces
galaxy.integr();
MPI_Allreduce(force_tmp,force,N*force,MPI_DOUBLE,MPI_SUM,MPI_COMM_WORLD);
return 0;
}
```

Figura 9. Pseudocódigo de cálculo de fuerzas entre N cuerpos con directivas MPI
Elaboración propia

La técnica del cálculo de fuerzas entre n cuerpos se esquematiza en la figura 10, en la cual se nota claramente una distribución equitativa de la *data* entre los nodos, así como el flujo de información en el transcurso de las iteraciones temporales.

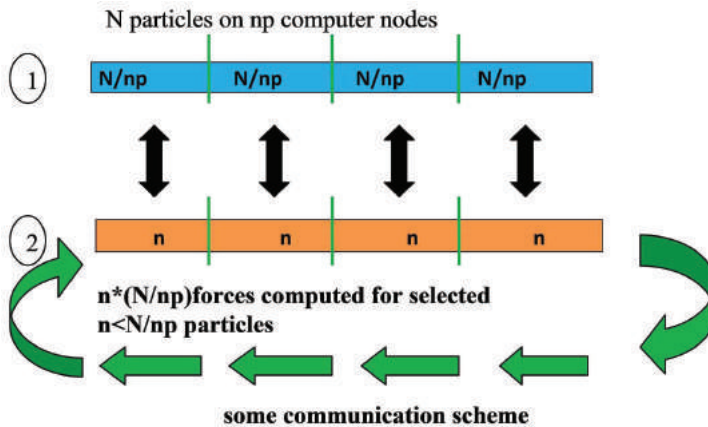


Figura 10. Mecanismo de memoria distribuida (MPI) para solucionar problemas.
Fuente: Fiestas (2011). IEEE 18th Real-time Conference, Berkeley, CA

El *software* usado para este estudio es un código híbrido escrito en C++ y CUDA, implementado con directivas MPI para asegurar el paralelismo efectivo que habrá de utilizarse en las supercomputadoras. Sobre todo se aplican los ejecutables en tarjetas gráficas Nvidia Tesla C1060 en el clúster Laohu (NAOC, Pekín). Este es un clúster con 85 nodos Dual Intel Xeon y 170 GPU. Así también, realizamos pruebas con tarjetas gráficas Nvidia Fermi Tesla C2050 en el clúster Mole-8.5 (IPE, Pekín) con 362 nodos Dual Intel Xeon, integrando un total de 2088 GPU (véanse las figuras 11 y 12).

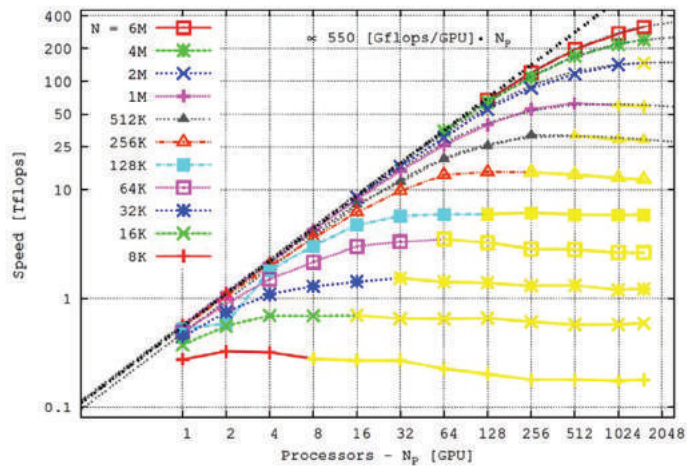


Figura 11. Escalabilidad en GPU clústeres de algoritmos de N-cuerpos
Fuente: Berczik, et al. (2011)



Figura 12. Cluster Mole-8.5 en el Institute of Process Engineering en Pekín, China
Fuente: Berczik, et al. (2011)

El código mencionado implementa un algoritmo de cálculo de N-cuerpos para aplicaciones en la astrofísica, utilizando un modelo de integración de Hermite de alto orden y un esquema de tiempos de bloque individuales (el código soporta tiempos de integración de partículas con esquemas de cuarto, sexto y octavo órdenes de aproximación). Asimismo, está paralelizado con directivas MPI, y utilizando en cada nodo varias tarjetas GPU. Este código fue inicialmente desarrollado por Keigo Nitadori y Peter Berczik, tal como lo señalan Hamada e Iitaka (2007), reescrito de una versión en C preparada para sistemas de *hardware* GRAPE (Harfst, Gualandris, Merrit, Spurzem, Portegies y Berczik, 2007).

El paralelismo se logró dividiendo equitativamente las partículas entre nodos (directivas MPI_Bcast()) y calculando en cada nodo fuerzas fraccionadas de partículas llamadas 'activas' en cada iteración temporal. El número de partículas activas (N_{act}) es normalmente pequeño en comparación con el número total de partículas N , pero puede variar en principio entre 1 y N . Todas las fuerzas calculadas que actúan en las partículas activas se obtienen finalmente utilizando la directiva MPI_Allreduce() de comunicación.

Los compiladores utilizados son GNU y el soporte de GPU se realiza utilizando las librerías de cálculo paralelo CUDA. A través de MPI se obtiene también soporte de paralelismo MultiGPU, de manera que cada CPU utiliza solo un GPU, pero es posible inicializar dos procesos MPI por nodo (para el caso de múltiples GPU por procesador). La versión actual no soporta directivas OpenMP. Se realizaron tests considerando un tiempo total de cómputo T_{tot} por intervalo de tiempo en unidades de código:

$$T_{tot} = T_{host} + T_{GPU} + T_{comm} + T_{MPI}$$

Donde T_{host} es el tiempo de cómputo de la CPU, T_{GPU} es el tiempo de cómputo de la GPU, T_{comm} el tiempo de comunicación de envío de data entre CPU y GPU, y T_{MPI} el tiempo de comunicación para intercambio de datos entre los nodos. Los resultados muestran que dos factores dominan el tiempo de cómputo (aproximadamente el 90 %). Estos son: el cálculo de fuerzas T_{GPU} y el tiempo de comunicación entre nodos T_{MPI} . Este último contiene una componente que depende del ancho de banda, y otro componente que depende de la latencia, lo cual se puede simplificar en

$$T_{tot} \sim T_{GPU} + T_{MPI}$$

Para efectos de calcular la velocidad de cómputo, o *performance* P , utilizamos la relación:

$$P = (\text{número total de operaciones})/T_{TOT} \quad \text{o} \quad P \sim \gamma N \Sigma(N_{act}) / T_{TOT}$$



Donde T_{TOT} es el tiempo de reloj necesitado en el cálculo de una unidad de tiempo de simulación (tiempo de N-cuerpos), γ representa el número de operaciones de coma flotante en nuestro algoritmo Hermite por partícula e intervalo de tiempo de N-cuerpos. Basado en un conteo detallado del mismo, obtenemos $\gamma = 60$.

Los tests demuestran que los clústeres de GPU utilizados con nuestra aplicación de N-cuerpos alcanzan un tercio del *peak* teórico calculado para este *hardware*. Esto demuestra que nuestro código hace posible alcanzar escalas sub-Petaflop en velocidad para aplicaciones reales con clústeres de GPU. La escalabilidad a regiones Exaflop es expectante.

2. Astrofísica de agujeros negros: modelo teórico

Este estudio analiza la evolución galáctica y de agujeros negros en tiempos comparables con la edad del universo (tiempo de Hubble). Un primer grupo de simulaciones utiliza modelos numéricos que aplican integración directa de la fuerza gravitatoria de Newton entre N cuerpos (N-body model). El agujero negro está representado por una masa pesada con valor inicial de $M_i/M_{tot} = 0.01 - 0.05$. Donde M_i es la masa del agujero negro y M_{tot} la masa total del bulbo de la galaxia. El número de partículas es $N=128000$ y $N=256000$. Estos modelos fueron ejecutados en supercomputadoras, como el clúster Laohu (NAOC, Pekín, China) de 85 nodos, el GPU clúster Kepler de 40 nodos (ZAH, Heidelberg, Alemania), y el clúster Dirac (NERSC, Berkeley, Estados Unidos) de 40 nodos. El código usado es llamado phiGPU (Khan, Preto, Berczik, Berentzen, Just y Spurzem, 2012). Las simulaciones tienen una conservación de energía hasta una exactitud no mayor a 10^{-4} , pasadas 10^4 unidades de tiempo N-Body. El parámetro de *softening* usado es 10^{-5} (Berczik et al., 2011). El segundo grupo de simulaciones utiliza el modelo de Fokker-Planck, basado en la solución de sistemas de ecuaciones de teoría de gases, que considera la extensión de la teoría de dinámica de gases a la dinámica estelar. Este código está definido en un dominio bidimensional (energía y momento angular), y es llamado FOPAX (Glass et al., 2011). Los modelos se clasifican por sus parámetros iniciales (King, 1966; Spitzer, 1987).

Potencial adimensional:

$$W_0 = (\Phi(r_{tid}) - \Phi_c) / \sigma_c^2$$

Donde $\Phi(r_{tid})$ es el potencial en el límite de marea y Φ_c el potencial central, y el parámetro de rotación inicial adimensional:

$$\omega_0 = \sqrt{(9/(4 \pi G n_c))} \Omega_0$$

Los radios están dados en unidades del radio inicial del sistema. Para las simulaciones se utilizaron modelos ($W_0=6.0$) y ($\omega_0=0.0, 0.3, 0.6, 0.9$), con elipticidad dinámica $e_{dyn} = 1 - b/a$ (Goodman, 1983).

La tabla 1 muestra los parámetros de los modelos iniciales para las simulaciones de N-cuerpos. En ella, la columna 1 es el identificador de la simulación, la columna 2 es el parámetro W_0 , la columna 3 es el parámetro de rotación, la columna 4 es la fracción de masas pesadas sobre la masa total del sistema, y la columna 5 es la masa inicial del agujero negro. La simulación se ejecutó en los clústeres (d) Dirac, (k) Kepler y (l) Laohu.

Tabla 1
Parámetros de modelos iniciales N-Body

Simulación	W_0	ω_0	f_h	μ
FPR11	6	0.0	0.01	10
FPR12	6	0.3	0.01	10
FPR13	6	0.6	0.01	10
FPR14	6	0.9	0.01	10
FPR21	6	0.0	0.75	5
FPR22	6	0.3	0.75	5
FPR23	6	0.6	0.75	5
FPR24	6	0.9	0.75	5
FPR31	6	0.0	0.50	2
FPR32	6	0.3	0.50	2
FPR33	6	0.6	0.50	2
FPR34	6	0.9	0.50	2

Elaboración propia

Tabla 2
Modelos iniciales Fokker-Planck

Simulación	W_0	ω_0	f_h	M_a
128KR1	6	0.0	0.01	0.01 (k)
128KR3	6	0.3	0.01	0.01 (l)
128KR4	6	0.6	0.01	0.01 (l)
128KR5	6	0.9	0.01	0.01 (k)
256KR1	6	0.0	0.01	0.01 (d)
256KR2	6	0.0	0.01	0.05 (d)
256KR3	6	0.9	0.01	0.01 (l)
256KR4	6	0.9	0.01	0.05 (l)

Elaboración propia



Con el objetivo especial de validar las simulaciones, se utilizó el modelo FOPAX, basado en la evolución del sistema en equilibrio dinámico, debido a la interacción gravitatoria entre partículas. Este tipo de modelos analíticos son considerados de aproximación, ya que no ofrecen una descripción detallada de la dinámica estelar, sino que manejan cantidades globales de energía y momento angular, con las cuales se pueden reproducir distribuciones de densidad y velocidad del sistema. El código FOPAX fue desarrollado con la implementación de una masa central, representando al agujero negro, como el descrito por Fiestas y Spurzem (2010). El sistema evoluciona de acuerdo al siguiente algoritmo:

1. Construcción del modelo inicial con pares de densidad y potencial.
2. Evolución debido a colisiones entre partículas en el paso Fokker-Planck con un potencial constante.
3. Cálculo de la función de distribución debido a cambios lentos del potencial: ecuación de Poisson.
4. Cálculo de la función de distribución debido al crecimiento de la masa del agujero negro.

Se usaron modelos de dos componentes de masa definidos con el parámetro $\mu = m_h/m_l$, y la fracción de masa total $f_h = M_h/M_l$, donde m_h es la masa individual de la partícula pesada (en unidades de código), m_l la masa de la partícula liviana (en unidades de código), y f_h la fracción de masa de la partícula pesada.

La configuración inicial de FOPAX se describe en la tabla 2. En ella, la columna 1 es el identificador de la simulación, la columna 2 es el parámetro W_0 , la columna 3 es el parámetro de rotación, la columna 4 es la fracción de masas pesadas sobre la masa total del sistema, y la columna 5 es la relación de masas individuales de la componente pesada sobre la liviana.

3. Resultados del estudio teórico

3.1 Morfología de núcleos galácticos

Los modelos expuestos representan sistemas estelares densos de geometría axisimétrica. A continuación discutimos los resultados obtenidos de los modelos ($W_0 = 6.0$), que representan un núcleo de geometría elipsoidal típicamente observada en bulbos de galaxias, y con fracción de masa $\mu=10$, comparando ambas técnicas de modelamiento.

En los modelos se observa segregación de masa inicial, por la cual la componente masiva se concentra en el centro del sistema, por causa de la transferencia de energía cinética de la componente liviana a la masiva, hasta lograr la equipartición, i.e., la energía térmica fluye desde adentro hacia afuera del sistema.

Como consecuencia, el núcleo pierde calor y se contrae, volviéndose más denso y caliente. Este fenómeno es característico de sistemas gravitatorios con capacidad calorífica negativa.

El fenómeno paralelo observado es que el agujero negro crece en masa, dominando lentamente la dinámica del sistema dentro de un radio de influencia determinado (r_a). Teóricamente, este radio está determinado por la expresión

$$r_a = G M / \sigma_c^2$$

Donde σ_c es la dispersión de la velocidad en la vecindad del agujero negro.

Las estrellas masivas atraídas por el potencial del agujero negro construyen un núcleo denso alrededor de este. En la figuras 13 y 14 se observa la distribución de densidad inicial y final del sistema en el plano XZ, donde la densidad y las coordenadas son dadas en unidades arbitrarias de modelamiento. El gradiente de densidad es notorio en la distribución final. Nótese que la forma elíptica se mantiene durante el proceso.

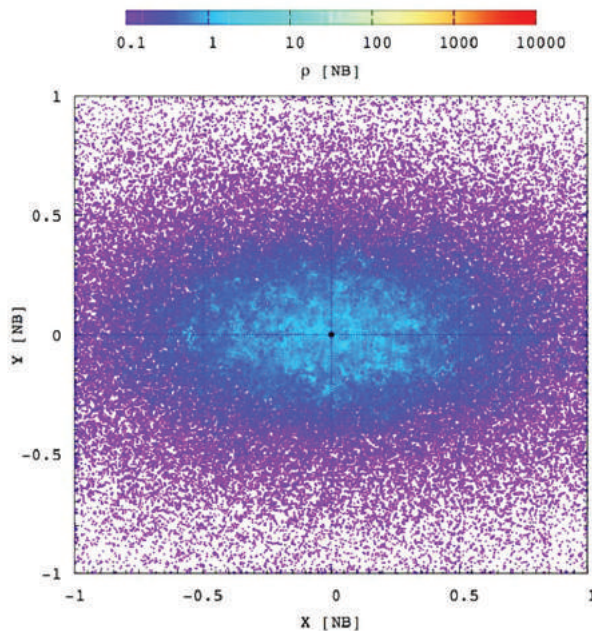


Figura 13. Densidad inicial en el plano XZ para modelos de dos componentes
Elaboración propia



Cabe destacar que los modelos N-Body muestran un desarrollo triaxial inicial (Berczik et al., 2006), el cual retorna rápidamente a la axisimetría. Este es un comportamiento típico de sistemas de rotación rápida, a consecuencia de una inestabilidad relacionada con el gradiente de rotación. En general, se espera que este tipo de sistemas mantengan cierto grado de rotación (Fiestas, Porth, Berczik y Spurzem, 2012). Sin embargo, hay un efecto nuevo de transporte de energía y momento angular entre masas distintas, como se verá a continuación.

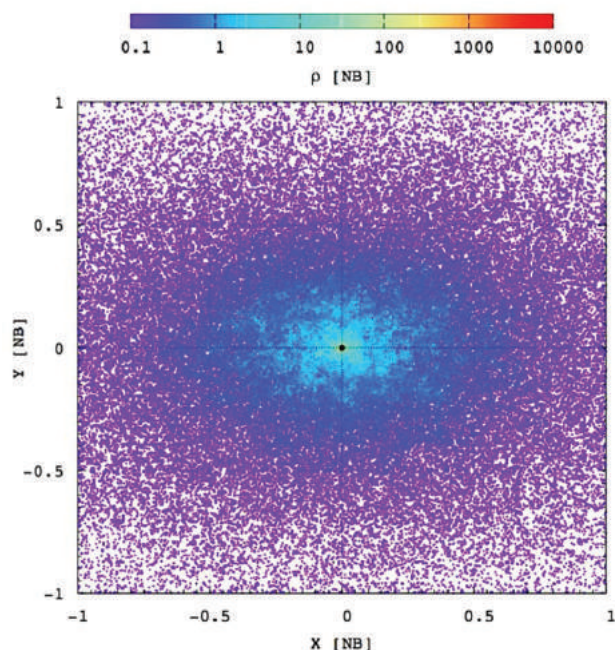


Figura 14. Densidad final en el plano XZ para modelos de dos componentes
Elaboración propia

Dinámicamente, el potencial del agujero negro calienta el núcleo del sistema, al capturar energía cinética de estrellas en órbitas capturadas de alta energía. El flujo de energía es dominado por encuentros gravitatorios de ángulo pequeño, por medio de los cuales las estrellas que se acercan al agujero negro pierden energía, mientras que las estrellas que interactúan gravitatoriamente con ellas ganan energía y se mueven a las capas exteriores. El transporte de momento angular es dominado inicialmente por el fenómeno de inestabilidad gravo-giratoria (Hachisu, 1982). Este efecto puede ser afectado por estrellas masivas capturadas, con movimiento

tangencial predominante. Por esto, se espera que cierto porcentaje de estrellas en órbitas de alto J_z se mantengan en el centro del sistema luego de este proceso.

Los modelos mostrados obtienen soluciones estables en la región de influencia del agujero negro, donde la dispersión de velocidad es proporcional al radio a la potencia de $-1/2$, y la densidad está dada por:

$$\rho(r) \propto r^{-\gamma}$$

Donde $\gamma = 7/4$. Esta es una solución característica de sistemas gravitatorios con potencial profundo (Bahcall y Wolf, 1977). Tanto los modelos Fokker-Planck como los N-Body encuentran la misma solución, lo que certifica su validez y demuestra que el potencial simétrico esférico del agujero negro es suficientemente fuerte para contrarrestar el carácter axisimétrico del sistema, en regiones dentro de su radio de influencia.

Otra característica es que los modelos rotatorios con masas distintas revelan una evolución más acelerada que los modelos de una sola masa (Kim, Lee y Spurzem, 2004). Esto se debe primero a la segregación de masa, y a la efectividad en el transporte de energía y momento angular, que es dominado por las estrellas masivas.

3.2 Rotación en núcleos galácticos

En la figura 15 se muestra la curva de rotación del sistema para un modelo de masa $M_{BH}=0.01$ y $\omega_0=0.6$. Se observa mayor rotación de las estrellas masivas (puntos rojos) que de las estrellas livianas (puntos azules). Esta diferencia se incrementa en dirección a radios pequeños hasta lograr una diferencia de un orden de magnitud. Como es mostrado por Kim et al. (2004), en sistemas rotatorios de varias masas sin agujeros negros, se advierte una transferencia de momento angular de las componentes masivas a las livianas, y el máximo de rotación se desplaza a regiones exteriores en el tiempo, mientras que el centro no evidencia signos notorios de rotación, comportándose más como un cuerpo rotatorio rígido.

En las simulaciones aquí presentadas se observa un fenómeno opuesto. Adicionalmente a la región rotatoria central, el máximo de rotación se mueve a regiones internas del sistema. Este proceso está claramente dominado por estrellas masivas, que están atrapadas en el potencial del agujero negro. Esto deja concluir que la transferencia de momento angular a las estrellas livianas como consecuencia de la inestabilidad gravo-giratoria, no es efectiva en este caso. Además, se observa que la rotación central no es kepleriana, y se concluye que se ve afectada por el transporte de momento angular en dirección externa.

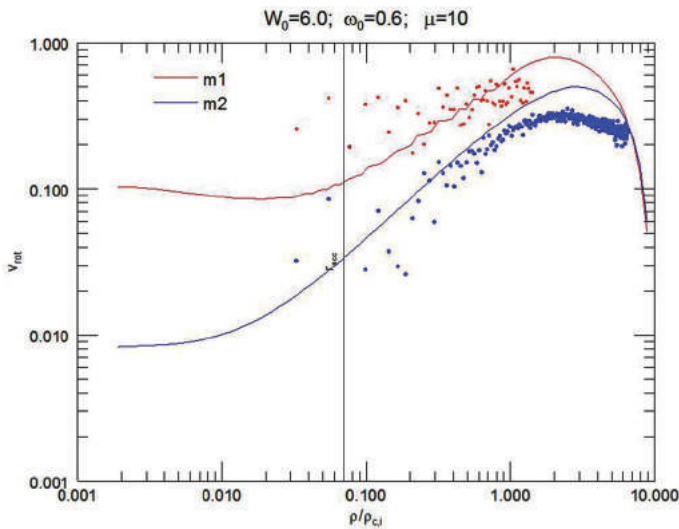


Figura 15. Curva de rotación en función del radio para el modelo de dos componentes con agujero negro central ($\omega_0=0.6$, MBH=0.01)
Elaboración propia

4. Conclusiones

Este estudio muestra una aplicación particular de HPC en la astrofísica, analizando la evolución de agujeros negros y los sistemas en los que están embebidos. Con respecto a la aplicación de técnicas HPC y supercomputadoras, se puede afirmar lo siguiente:

1. El *software* en paralelo utilizando GPU permite explotar la eficiencia de estos sistemas al asignar tareas computacionales intensas, que a través del paralelismo MPI disminuyen en conjunto el tiempo total de cómputo significativamente.
2. El *hardware* utilizado (clúster de GPU) con nuestra aplicación de N-cuerpos (phiGPU), alcanza un tercio del *peak* teórico calculado. Con ello llegamos a una *performance* a escalas sub-Petaflop en velocidad para aplicaciones reales.
3. El desarrollo de técnicas de HPC y supercomputación, que han hecho posible este estudio, tiene un potencial inmenso tanto en la investigación como en la educación en general y la industria. Nuestro país no debe ser ajeno a ese desarrollo, sino impulsar la explotación de estos instrumentos de aprendizaje a todo nivel.

Referencias

- Bahcall, J., y Wolf, R. (1977). The star distribution around a massive black hole in a globular cluster. II Unequal star masses. *The Astrophysical Journal*, 216, 883. DOI: 10.1086/155534
- Berczik, P., Merritt, D., Spurzem, R., y Bischof, H. (2006). Efficient merger of binary supermassive black holes in nonaxisymmetric galaxies. *The Astrophysical Journal*, 642(1), L21–L24. DOI: 10.1086/504426
- Berczik, P., Nitadori, K., Zhong, S., Spurzem, R., Hamada, T., Wang, X., ... Ge, W. (2011). High performance massively parallel direct N-body simulations on large GPU clusters. *International Conference on High Performance Computing*, pp. 8-18. Ukraine.
- Chen, S., Lin, G., Hsiung, P., y Hu, Y. (2009). *Hardware software co-design of a multimedia SOC platform*. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Coté, P., Ferrarese, L., Jordan, A., Blakeslee, J. P., Chen, C., Infante, L., ... West, M. J. (2007). The ACS fornax cluster survey. II. The Central brightness profiles of early-type galaxies: a characteristic radius on nuclear scales and the transition from central luminosity deficit to excess. *The Astrophysical Journal*, 671(2), 1456-1465. DOI: 10.1086/522822
- Degraf, C., Di Matteo, T., y Springel, V. (2010). Faint-end quasar luminosity functions from cosmological hydrodynamic simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 402(3), 1927-1936. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2009.16018.x
- Eckart, A., Genzel, R., y Schödel, R. (2004). The Massive Accreting Black Hole at the Center of the Milky Way. *Progress of Theoretical Physics Supplement*, 155, 159-165. DOI: 10.1143/PTPS.155.159
- Ferrarese, L., y Merritt, D. (2000). A fundamental relation between supermassive black holes and their host galaxies. *The Astrophysical Journal*, 539(1), L9-L12. DOI: 10.1086/312838
- Fiestas, J., Spurzem, R., y Kim, E. (2006). 2D Fokker-Planck models of rotating clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 373(2), 677-686. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2006.11036.x
- Fiestas, J., y Spurzem, R. (2010). Dynamical evolution of rotating dense stellar systems with embedded black holes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2010.16479.x
- Fiestas, J., Porth, O., Berczik, P., y Spurzem, R. (2012). Evolution of growing black holes in axisymmetric galaxy cores. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 419(1), 57-69. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2011.19670.x



- Glass, L., Ferrarese, L., Côté, P., Jordán, A., Peng, E., Blakeslee, J. P., ... West, M. J. (2011). The ACS Fornax cluster survey. IV. Deprojection of the surface brightness profiles of early-type galaxies in the Virgo and Fornax clusters: investigating the "core/power-law dichotomy." *The Astrophysical Journal*, 726(1), 31. DOI: 10.1088/0004-637X/726/1/31
- Goodman, J. (1983). *Dynamical relaxation in stellar system*. Tesis para optar el título de doctorado. Princeton University, New Jersey, Estados Unidos.
- Hachisu, I. (1982). Gravothermal and gravogyro catastrophes of rotating and self-gravitating gaseous disks. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 34, 313.
- Hamada, T., y Itaka, T. (2007). The chamomile scheme: an optimized algorithm for n-body simulations on programmable graphics processing units. Recuperado de <http://arxiv.org/pdf/astro-ph/0703100v1.pdf>
- Harfst, S., Gualandris, A., Merritt, D., Spurzem, R., Portegies Zwart, S., y Berczik, P. (2007). Performance analysis of direct N-body algorithms on special-purpose supercomputers. *New Astronomy*, 12, 357-377.
- Khan, F., Preto, M., Berczik, P., Berentzen, I., Just, A., y Spurzem, R. (2012). Mergers of unequal-mass galaxies: supermassive black hole binary evolution and structure of merger remnants. *The Astrophysical Journal*, 749(2), 147. DOI: 10.1088/0004-637X/749/2/147
- Kim, E., Lee, H., y Spurzem, R. (2004). Dynamical evolution of rotating stellar systems - III. The effect of the mass spectrum. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 351(1), 220-236. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2004.07776.x
- King, I. (1966). The structure of star clusters. IV. Photoelectric surface photometry in nine globular clusters. *The Astronomical Journal*, 71, 276. DOI: 10.1086/109918
- Kormendy, J. (2004). The stellar-dynamical search for supermassive black holes in galactic nuclei. En *Carnegie Observatories Centennial Symposia, Vol. 1: Coevolution of black holes and galaxies*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Madau, P., y Rees, M. J. (2001). Massive black holes as population III remnants. *The Astrophysical Journal*, 551(1), L27-L30. DOI: 10.1086/319848
- Mapelli, M., Huwyler, C., Mayer, L., Jetzer, P., y Vecchio, A. (2010). Gravitational waves from intermediate-mass black holes in young clusters. *The Astrophysical Journal*, 719(2), 987-995. DOI: 10.1088/0004-637X/719/2/987
- Moore, G. E. (1965). Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics*, 38(8), 114-117.

- Shankar, F. (2009). The demography of supermassive black holes: Growing monsters at the heart of galaxies. *New Astronomy Reviews*, 53(4-6), 57-77. DOI: [org/10.1016/j.newar.2009.07.006](https://doi.org/10.1016/j.newar.2009.07.006)
- Spitzer, L. (1987). *Dynamical evolution of globular clusters*. New Jersey: Princeton University Press.
- Willott, C. J., Delorme, P., Reylé, C., Albert, L., Bergeron, J., Crampton, D., ... Schade, D. (2010). The Canada-France High- z Quasar Survey: Nine new quasars and the luminosity function at redshift 6. *The Astronomical Journal*, 139(3), 906-918. DOI: [10.1088/0004-6256/139/3/906](https://doi.org/10.1088/0004-6256/139/3/906).